

三种车型的全方位移动平台模糊滑模运动控制研究

田 鹏, 张豫南, 黄 涛, 闫永宝

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 为了加强全方位移动平台的承重能力, 提出了3种平台车型布局的设计方案, 然而由于布局改变或载重后导致重心偏移, 致使平台在全方位移动时出现偏差; 使用模糊滑模控制方法来消除重心偏移对于全方位移动的影响, 在进行圆轨迹跟踪联合仿真后, 其结果表明模糊滑模控制方法完全适用于三种车型的控制, 有效克服了因重心偏移而导致全方位移动出现偏差的问题, 跟踪误差几乎为零, 并且实现单一控制算法的通用化, 统一化。

关键词: 全方位移动; 模糊滑模控制; 运动控制

Research on Motion Control with Fuzzy Sliding Mode Control of Three Kinds of Omnidirectional Platforms

Tian Peng, Zhang Yunan, Huang Tao, Yan Yongbao

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to strengthening the weight capacity to the omnidirectional platform, three kinds of layout designs for platforms are put forward. Because the layout changed or load causes the center of gravity offset, the platform has motion deviation with omnidirectional motion. Fuzzy sliding mode control is used to eliminate the omnidirectional motion influence caused by center of gravity offset. After joint simulation with circle trajectory tracking, the results indicate that fuzzy sliding mode control method is applicable for the control of three omnidirectional platforms to overcoming the motion deviation effectively caused by center of gravity offset in omnidirectional motion. The tracking error is zero nearly. And the control algorithm is universal and unified.

Key words: omnidirectional motion; fuzzy sliding mode control; motion control

0 引言

全方位移动机器人是指如果不考虑驱动电机转速限制, 机器人能够在任何时刻向平面上任何方向运动^[1]。即利用车轮所具有的定位和定向功能, 实现在二维平面上从当前位置向任意方向运动而不需改变车体姿态, 并且能够零半径(中心)转向。因此全方位移动机器人具有平面上的3个运动自由度, 即沿X、Y轴的平动和绕Z轴的转动。当前, 由于全方位轮具有灵活的机动性能, 被广泛应用于军事安全^[2]、航空航天、社会服务、仓储运输等领域的全方位移动机构之中。

全方位移动机构中, 其轮子布局结构也有所不同。文献[3]研究了全方位轮的三轮向心布局和四轮向心布局的运动性能; 文献[4]搭建了四轮驱动的全方位机器人的仿真模型并对其进行了仿真分析; 文献[5]的全方位移动平台由3个偏心方向轮构成, 轮间夹角为120°; 文献[6]研制了采用4个连续切换轮的布局可变的全方位移动机构, 提高了移动机器人的运动性能。

由于四轮全方位移动平台的承重能力较弱以及载重后行驶平稳性变弱, 且载重后因重心偏移会导致全方位移动出现偏差。本文为了满足承重需求, 设计了3种全方位移动平台车型, 主要目的是为了使得车体可以加载重物, 并满足在狭小空

间内全方位移动的需求。

1 建模与仿真分析

1.1 三种平台车型设计

全方位移动平台的一大用途就是利用其全方位移动的特性, 在狭窄空间内搬运货物。为了增加承重, 提高平台的载重能力, 设计出六轮的全方位移动平台。但是根据全方位轮的受力特点^[7], 即四轮受力, 其合力的作用效果才能产生全方位移动, 故而多增加的一对轮子, 只是随动, 以满足全方位移动和承重的要求。

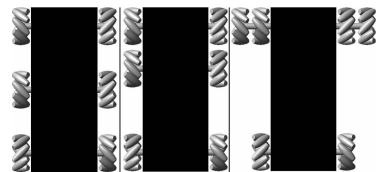


图1 3种全方位平台布局图

图1为3种全方位平台设计布局图, 从左至右依次为平台A、平台B和平台C。平台A与平台B前后轮均采用四轮纵向对称布局结构, 前后四轮驱动, 中间两轮随动, 平台A的随动轮与前后车轮的间距相等, 而平台B的中间随动轮靠近前侧。平台C同样采用四轮驱动, 车体前侧两端远离车体的全向轮是随动的。3种车型, 从设计上都加强了车体的承重能力。

1.2 动力学、运动学建模

3种平台车型中, 无论是否载重货物, 平台B和平台C其

收稿日期: 2013-11-25; 修回日期: 2014-01-20。

基金项目: 军队计划科研项目(2012ZB16)。

作者简介: 田 鹏(1984-), 男, 博士生, 主要从事导航制导与控制方向的研究。

重心已经发生偏移, 如果平台 A 所在货物的中心不在其几何中心上, 那么平台 A 的重心也会发生偏移。如果将平台中的一组随动轮或是载重后对重心的影响看作是外界的干扰, 假设去除这些干扰, 其车型就是四轮对称布局的全方位移动平台。为了便于建模, 对四轮全方位平台做如下假设:

- (1) 平台、全方位轮和地面均为刚体, 平台在平面上运动;
- (2) 轮子与地面间摩擦力足够大, 轮子不发生打滑;
- (3) 平台的重心在其几何中心上。

则可以得到其逆运动学方程和拉格朗日动力学方程^[8], 逆运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -1 & 1 & (l+w) \\ 1 & 1 & -(l+w) \\ -1 & 1 & -(l+w) \\ 1 & 1 & (l+w) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\dot{\theta}_i$ 为第 i 轮子的角速度; \mathbf{J} 为运动方程的雅可比矩阵; \dot{x}, \dot{y} 分别为平台沿横向和纵向的速度分量; $\dot{\theta}_z$ 为平台的转动角速度; R 为轮子的半径; l, w 分别为前后轮和左右轮中心距的一半。

取平台的广义坐标为轮子的角速度 $\dot{\theta}$, 广义力为轮子的转矩 T , 因此得到拉格朗日动力学方程:

$$T = \mathbf{M}\dot{\theta} + D_w\ddot{\theta} \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} G+H+I_w & -H & G-H & H \\ -H & G+H+I_w & H & G-H \\ G-H & H & G+H+I_w & -H \\ H & G-H & -H & G+H+I_w \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{mR^2}{8}, H = \frac{I_z R^2}{16(l+w)^2},$$

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T \in \mathbf{R}^4,$$

$$T = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]^T \in \mathbf{R}^4,$$

$D_w = \text{diag}(D_{w1}, D_{w2}, D_{w3}, D_{w4}), I_z$ 和 I_w 分别为平台和轮子的转动惯量, D_w 为轮子的黏性摩擦系数, $\ddot{\theta}$ 为轮子的角加速度。

1.3 平台样机仿真分析

为了验证上述分析的正确性, 确定 3 种新车型在无载重的情况下是否满足全方位移动的要求, 采用多体动力学分析软件 RecurDyn 分别对其上述 3 种平台进行三维简化建模, RecurDyn 能更好的体现仿真环境中的非线性不确定因素。该模型在物理建模过程中考虑了实际系统的非线性影响, 其更加接近实际的运动情况。通过与 Matlab/Simulink 进行联合仿真, 模拟实际工作情况, 能够有效地验证平台运动情况。

平台样机的仿真结果如图 2 所示, 从左至右依次是: 平台 B 侧移、平台 C 侧移和平台 C 中心转向。由于平台 B 和平台 C 的重心已不在其车体几何中心上, 使其在进行斜行、横移、中心转向运动时会出现偏差, 分析仿真结果得到如下结论:

- (1) 在平动运动中, 在重心与平面几何中心连线方向的运动不受影响, 运动轨迹为直线;

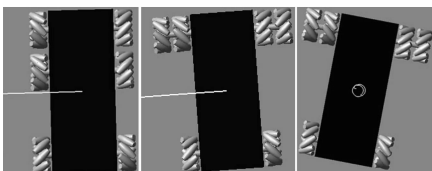


图 2 平台样机仿真结果

- (2) 除上述方向外的其它方向, 平台的运动轨迹为曲线, 且车身发生一定的偏移;

- (3) 对于中心转向, 则存在转向半径。

2 模糊滑模控制器设计

滑模控制是一种非线性控制, 其可以在动态过程中, 根据系统当前的状态有目的地不断变化, 迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动, 所以滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关, 其具有对系统参数和外部干扰呈不变性, 保证系统渐近稳定等优点, 特别适合于控制非线性、时变、不确定性系统^[9]。

平台重心偏移而导致全方位移动出现偏差, 为了避免这种偏差且能够实现控制算法的通用性即无论载重与否, 均可以使用同一控制算法对 3 种车型的移动偏差进行减小甚至是消除, 故而采用模糊滑模控制方法对其进行控制。在一般的滑模控制器中, 控制律通常由等效控制和切换控制组成, 等效控制将系统保持在滑模面上, 切换控制迫使系统状态在滑模面上滑动。滑模控制的鲁棒性由切换控制体现, 而滑模控制的抖振也由切换控制造成。为了消除抖振, 应使切换控制在保证鲁棒性的同时尽量小些。为此可利用模糊规则, 将外界的干扰转化为切换增益的有效估计, 在保证鲁棒性的同时减轻滑模控制的抖振。其控制结构如图 3 所示。

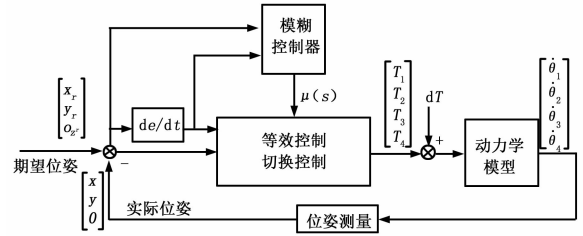


图 3 模糊滑模控制结构图

2.1 滑模控制器设计

由公式 (1) 和 (2) 得到全方位移动平台的动力学模型:

$$\ddot{X} = -J^+ M^{-1} D_w J \dot{X} + J^+ M^{-1} T + dT \quad (3)$$

式中, $X = [x \ y \ \theta_z]^T$ 为平台的位姿, $dT = [dT_1 \ dT_2 \ dT_3 \ dT_4]^T$ 为各个轮子受到的干扰, 假设 $|dT_i| \leq D_i, D_i$ 为干扰上界。

系统输入为平台的期望位姿 $X_r = [x_r \ y_r \ \theta_{r_z}]^T$, 定义位姿误差:

$$\begin{cases} E = X_r - X \\ \dot{E} = \dot{X}_r - \dot{X} \end{cases} \quad (4)$$

设计切换函数:

$$S_i = C_i e_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

式中, $C_i = [c_{i1} \ 1]$, $c_{i1} > 0$, 是切换函数的系数矩阵; $e_i = [E_i \ \dot{E}_i]^T$, 是切换函数的误差矩阵。

对于等效控制, 不考虑平台的外界干扰, 可以得到:

$$\begin{cases} \ddot{X} = -J^+ M^{-1} D_w J \dot{X} + J^+ M^{-1} T_q \\ \dot{S}_i = C_i \dot{e}_i = c_{i1} \dot{E}_i + \dot{E}_i = c_{i1} \dot{E}_i + \ddot{X}_{ri} - \ddot{X}_i \end{cases} \quad (6)$$

定义 $S = [S_1 \ S_2 \ S_3]^T$, 通过取 $\dot{S}_i = 0$, 得到等效控制律:

$$T_q = \mathbf{M} \mathbf{J} (C \dot{E} + \ddot{X}_r) + D_w \mathbf{J} \dot{X} \quad (7)$$

式中, $C = \text{diag}(c_{11} \ c_{21} \ c_{31})$ 。

为了满足滑模到达条件, 采用切换控制, 定义切换控制:

$$T_w = \mathbf{MJ}\eta \text{sgn}(S) \quad (8)$$

其中: 切换增益 $\eta = \text{diag}(\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3), \eta_i \geq (J^+ M^{-1} D)_i, \eta_i > 0$ 。

基于等效控制的滑模控制律为:

$$T = T_q + T_w = \mathbf{MJ}(C\dot{E} + \ddot{X}_r) + D_w J \dot{X} + \mathbf{MJ}\eta \text{sgn}(S) \quad (9)$$

为保证系统的稳定性, 设计 Lyapunov 函数为 $V_i = \frac{1}{2} S_i^T S_i$, 则:

$$\dot{V}_i = S_i^T \dot{S}_i = S_i^T [-\eta_i \text{sgn}(S_i) - (J^+ M^{-1} D)_i] = [-S_i^T \eta_i \text{sgn}(S_i) - S_i^T (J^+ M^{-1} D)_i] \leq 0 \quad (10)$$

因此系统是稳定的。

2.2 模糊控制器设计

利用模糊控制对切换增益进行估计, 将切换函数 S 和及其导数 \dot{S} 作为模糊控制器的输入, 通过模糊推理和反模糊化得到模糊控制器的输出切换控制增益 $\mu_i \eta_i$, 因此, 模糊滑模控制器输出为:

$$T = T_q + \mu(S) T_w = \mathbf{MJ}(C\dot{E} + \ddot{X}_r) + D_w J \dot{X} + \mathbf{MJ}\mu(S)\eta \text{sgn}(S) \quad (11)$$

其中, $\mu(S) = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \mu_3)$

模糊控制器设计包括以下 3 个部分:

(1) 模糊化。通过量化, 模糊控制器的输入变量为 S_i 和 \dot{S}_i 及输出变量 μ_i 。其语言变量值分别为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 模糊论域为 $S_i = \dot{S}_i = \mu_i = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$, 上述模糊化变量均选择三角形隶属函数。

(2) 模糊控制规则。模糊推理采用双输入单输出的二维模糊控制器结构。模糊控制器的设计原则: 一是保证滑模存在性和能达性条件; 二是在相点离滑模面较远处, 取较大的切换增益; 而在相点接近滑模面时, 取较小的切换增益, 具体控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

$S_i \backslash \dot{S}_i$	μ_i	S_i	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS	PS	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PS	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	PS	PS	PS

(3) 去模糊化。采用重心法将模糊输出精确化:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_i u(\mu_i)}{\sum_{i=1}^{49} u(\mu_i)} \quad (12)$$

由此可得到模糊控制查询表, 实际控制时可根据 S_i 和 \dot{S}_i 的值, 得到 μ_i 的值, 从而达到根据实际情况降低控制量抖振的目的。

3 联合仿真结果与分析

以四轮全方位移动平台的样机参数作为仿真参数, 取整车

质量 $m = 1\ 704\ \text{kg}$, 整车几何中心点转动惯量 $I_z = 692\ \text{kgm}^2$, 单轮转动惯量 $I_w = 1.75\ \text{kgm}^2$, 轮子半径 $R = 0.23\ \text{m}$, $l = 0.675\ \text{m}$, $w = 0.525\ \text{m}$, 滑模控制参数为: $C_i = [10\ 1]$ 。

为了验证控制算法减小偏移误差的有效性, 使用模糊滑模控制对上述 3 种车型进行圆轨迹控制仿真, 仿真后横向误差结果如图 4 所示。为了进一步验证模糊滑模控制是否同样适用于载重情况下的全方位移动, 分别在 3 种平台上搭载重物块, 同样进行圆轨迹跟踪来验证控制方法, 仿真结果如图 5 所示。

通过仿真结果可知, 3 种平台车型在进入圆轨迹后可以在保持本身姿态不变的情况下完成圆轨迹跟踪, 实现全方位移动, 其模糊滑模控制方法可以对 3 种车型完成统一控制, 运动误差在进入圆轨迹后基本趋近于零。在搭载重物后, 3 种车型同样可以完成圆轨迹跟踪, 模糊滑模控制方法有效克服了新车型因重心改变而导致全方位移动出现的偏差。

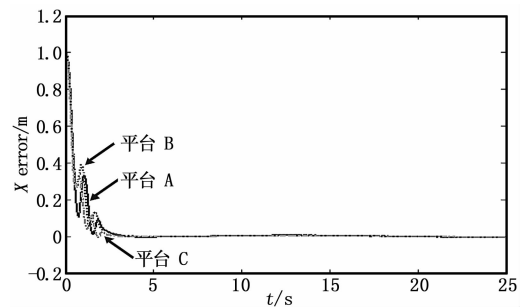


图 4 3 种平台圆轨迹跟踪横向误差图



图 5 3 种平台搭载重物后圆轨迹跟踪图

4 结语

本文以 3 种新型的全方位移动平台为研究对象, 以四轮全方位移动平台为基础参数设置, 利用模糊滑模控制方法对 3 种车型进行控制, 通过分别对 3 种平台是否搭载重物进行圆轨迹跟踪联合仿真, 验证其全方位移动的有效性, 表明模糊滑模控制方法可以有效克服重心偏移对车型的影响, 使 3 种新平台车型基本实现无偏差全方位移动, 验证了车型设计的有效性, 并实现了单一控制算法控制多种车型, 使得控制方法具有通用性, 统一化。

参考文献:

[1] 赵冬斌, 易建强. 全方位移动机器人导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-7.
 [2] McGo wen H. Navy omni-directional vehicle (ODV) development: where the rubber meets the deck [J]. Naval Engineers Journal. 2000: 217-228.
 [3] Zhang Y N, Wang S S, Zhang J, et al. Research on Motion Characteristic of Omnidirectional Device based on Mecanum Wheel [A]. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE) [C], WuHan, China, 2011.
 [4] 吴定会, 黄旭东, 纪志成. 四轮驱动全方位移动机器人仿真 [J].

微特电机, 2007, (12): 1-3.

[5] 李新春, 赵东斌, 易建强. 一种全方位移动机械手的可操作度分析 [J]. 中国机械工程. 2006, 17 (14): 1442-1447.

[6] Byun K S, Kim S J, Song J B. Design of a four-wheeled omnidirectional mobile robot with variable wheel arrangement mechanism [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C], 2002: 720-725.

[7] 吕文伟. 全方位轮移动机构的结构设计 [J]. 机械与电子, 2006, (12): 63-65.

[8] 王双双, 张豫南, 张健, 等. 基于观测器的全方位平台滑模轨迹跟踪控制 [J]. 计算机仿真, 2012, (29) 10: 204-208.

[9] 王宏文, 徐津娜, 李耀婷, 等. 基于阿克曼公式模糊切换增益调节的滑模控制 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 2979-2981.

(上接第 1341 页)

3.2 模拟车行实验

在对桥梁进行动态测量时, 测量的对象是各个测点的时间历程值, 也称为时程曲线, 通过将这些记录值在时域或频域下进行统计分析, 为后续的相关设计工作提供计算依据。由于桥梁本身固有频率较低, 因此在对它进行动态测量时, 应当以位移为主要测量对象, 即各个测点的动态挠度值。

在模拟车行实验中, 将一个运动的物体以不同速度通过桥梁模型, 然后记录下梁体上各个测点的动态挠度变化值。在实验过程中, 为了便于实验结果的对比分析, 选择了挠度值变化最为明显的测点 2 为主要观测点, 并在该测点下方放置一个激光位移传感器来记录该测点的动态挠度变化值。

图 5 为运动物体在不同运动速度下的三点法与激光位移传感器测量得到的测点 2 的动态挠度时程曲线对比图, 由图中可以看出, 用这两种方法得到的测量结果同样具有较好的吻合度。

4 结束语

采用三点测量法来测量桥梁挠度可直接以各个测点为相互参考点而无需额外选取静态参考点, 特别适合于无法架设测量设备的场合。通过大量的静态、动态试验结果表明, 该方法均具有很高的精度。在今后的工作中, 还可以引入无线传输技术至传感器中, 组成无线传感网络, 进一步扩大该方法的应用范围。

参考文献:

[1] 姜晨光, 刘华, 刘桂芳, 等. 自动电子全站仪桥梁三维动态变形实时监测系统 [J]. 铁路航测, 2003, (2): 38-40.

[2] 杨建春, 陈伟民. 连通管式光电挠度测量系统及其大桥监测应用 [J]. 光电子. 激光, 2006, 17 (3): 343-346.

[3] Whiteman T, Lichti D D, Chandler I. Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry [A]. Proceedings of the Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications [C], Ottawa, ON, Canada: ISPRS Commission IV, 2002: 9-12.

[4] Celebi M. GPS in dynamic monitoring of long-period structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20 (5): 477-483.

[5] Nassif H H, Gindy M, Davis J. Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration [J]. NDT & E International, 2005, 38 (3): 213-218.

[6] 杨学山, 侯兴民, 廖振鹏, 等. 桥梁挠度测量的一种新方法 [J]. 土木工程学报, 2002, 35 (2): 92-96.

[7] 赵辉, 马东丽, 刘伟文, 等. 用于防水数显卡尺的新型感栅式位移传感器设计 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38 (8): 1382-1384.

[8] Lu C, Liu W, Zhang Y, et al. Experimental Estimating Deflection of a Simple Beam Bridge Model Using Grating Eddy Current Sensors [J]. Sensors, 2012, 12 (8): 9987-10000.

[9] 马东丽, 赵辉. 用于调频式电涡流传感器的高稳定性 LC 振荡电路 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (3): 298-300.

[10] Weiwen L, Hui Z, Hongli Q. Research on novel grating eddy-current absolute-position sensor [J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2009, 58 (10): 3678-3683.

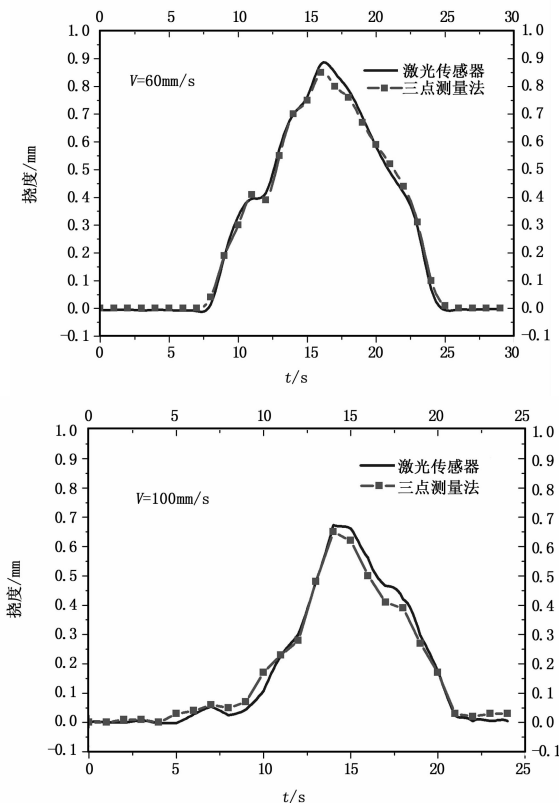


图 5 测点 2 挠度时程曲线